

УДК 621.924

О. Б. Білоцерківський*

В. О. Жовдак*, д-р. техн. наук

С. І. Яцько**, канд. техн. наук

О. В. Черних**

* Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

(м. Харків, Е-mail: belocerc@kpi.kharkov.ua)

** Українська державна академія залізничного транспорту

РОЗРАХУНОК ВИПАДКОВИХ КОЛИВАНЬ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ РАМ ВІЗКІВ ВАГОНІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

Розроблено теоретичні підходи, математичні моделі і програмне забезпечення для вирішення таких задач: випадкових вимушених коливань з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари рам візків і прогнозування безвідмовності рам візків при одночасному врахуванні випадковості зовнішнього навантаження і характеристик опору втомі. Розроблено методи прогнозування безвідмовності за даними про відмови прототипу.

Разработаны теоретические подходы, математические модели и программное обеспечение для решения следующих задач: случайных вынужденных колебаний с учетом запаздывания кинематического случайного внешнего воздействия на колесные пары рам тележек и прогнозирования безотказности рам тележек при одновременном учете случайности внешней нагрузки и характеристик сопротивления усталости. Разработаны методы прогнозирования безотказности по данным об отказах прототипа.

Актуальність роботи та аналіз досліджень. Залізничний транспорт займає провідне місце серед видів транспорту по об'ємах вантажних і пасажирських перевезень України. Невід'ємною частиною рухомого складу залізничного транспорту є електропоїзди метрополітенів, що призначені для забезпечення масових перевезень пасажирів у транспортних системах великих міст. Однак, не зважаючи на ці обставини, під час експлуатації вагонів електропоїздів спостерігається велика кількість відмов, значний процент яких має механічне походження. Окремо треба виділити виникнення втомних тріщин в зварних конструктивних елементах візків вагонів. Вказані обставини зумовлюють зниження економічної ефективності, що приводить до значних витрат та можливості виникнення аварійних ситуацій.

Наведені причини вказують на актуальність робіт, пов'язаних з розробкою розрахунково-експериментальних методів для прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів з урахуванням випадковості характеристик міцності матеріалу конструкції, технології виготовлення, а також випадковості навантаження в конкретних умовах експлуатації. Розробка таких методів та їх впровадження в практику проектування та експлуатації дозволить отримати значний економічний ефект та створити безпечні умови використання рухомого складу в цілому.

Вирішення задач прогнозування безвідмовності рам візків вагонів повіdkового типу проводилося в роботах [1, 2, 3], де враховувався випадковий розкид характеристик опору втомі й навантаження. Розрахунок наробітку до відмови для шпінтонних візків наведений в роботі [4], в якій застосовувався метод скінченних елементів (МСЕ) для одержання статичних напружень від ваги вагона, а динамічні напруження визначалися з роботи [2]. При цьому використовувалися детерміновані значення межі витривалості.

У наведених роботах для одержання статичних і динамічних напружень, необхідних для прогнозування безвідмовності рам візків, були використані або експериментальні дослідження, які є трудомісткими, або спрощені

розрахункові моделі, що не враховують всіх особливостей геометрії конструкцій.

1. Постановка задачі. Об'єктом дослідження є рами візків вагонів типу 81-717, що широко використовуються в метрополітенах України та країн СНД [5, 6]. Розглядається задача розрахунку випадкових коливань та прогнозування безвідмовності візків типу 81-717 за прототипом (ЄЖ-3). Оскільки рами візків типу 81-717 мають подібну технологію виготовлення і експлуатуються за схожих умов навантаження, що і рами візків типу ЄЖ-3, то можна прогнозувати безвідмовність рам візків типу 81-717 за даними про відмови прототипу.

Розроблено підхід прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів за прототипом, що включає такі етапи:

1. Статистична обробка експериментальних даних з напрацювань до відмови прототипу з метою виявлення можливих моделей відмов і місць їх виникнення.
2. Ідентифікація характеристик навантаження та опору матеріалу конструкції прототипу можливим моделям відмов.
3. Розрахункове прогнозування характеристик безвідмовності прототипу з метою перевірки достовірності моделей, що використовуються.
4. Розрахункове визначення параметрів напружено-деформованого стану нового об'єкта за експлуатаційних умов навантаження.
5. Розрахункове прогнозування безвідмовності нових об'єктів при дотриманні умов подібності навантаження об'єкта і характеристик опору матеріалу конструкції заданим моделям відмов.

2. Побудова математичних моделей рам візків вагонів типу 81-717

Розробка моделей рам візків проводилася на базі МСЕ в формі переміщень з використанням стрижневих, оболонкових та об'ємних скінченних елементів (СЕ), а також СЕ типу жорсткість і маса. На основі аналізу результатів чисельних досліджень рам візків здійснений вибір раціональних СЕ моделей.

Також зроблено огляд існуючих моделей шляху. Обрано дискретну модель шляху, що являє собою шлях як сукупність жорсткостей та мас. Конструкція рами візка вагону із СЕ сіткою показана на рис. 1.

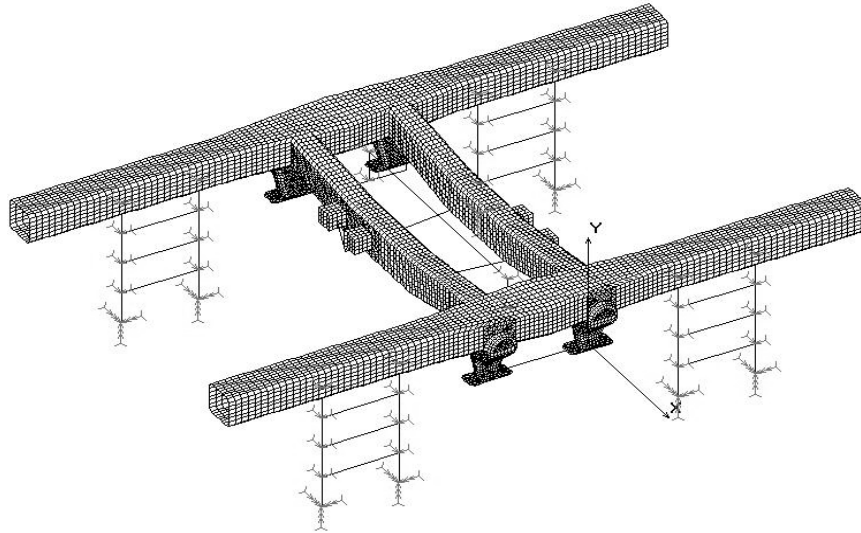


Рис. 1. СЕ модель конструкції рами візка вагону

3. Аналіз власних коливань рам візків вагонів. Проведено експериментальні дослідження власних коливань рам візків серії 81-717. Визначення резонансних частот візка здійснювалося з використанням п'єзоелектричних вібродатчиків прискорення. Резонансні частоти визначалися при збудженні коливань від вібратора роздільно у вертикальному (рис. 2), подовжньому і поперечному напрямках. Проведено розрахунок власних коливань рам візків серії 81-717 з використанням програмного комплексу COSMOS/M. Розрахункові та експериментальні значення власних частот рам візків типу 81-717 наведено в табл. 1. Рама візка типу 81-717 та її перші три форми власних коливань показані на рис. 3.

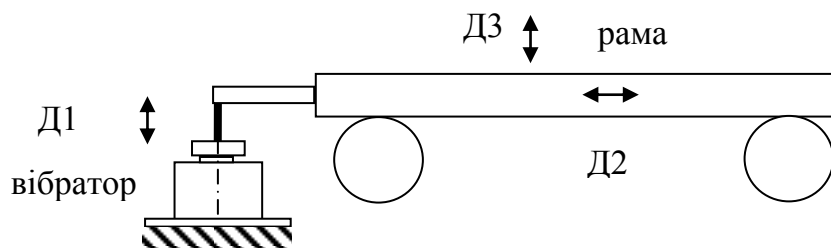


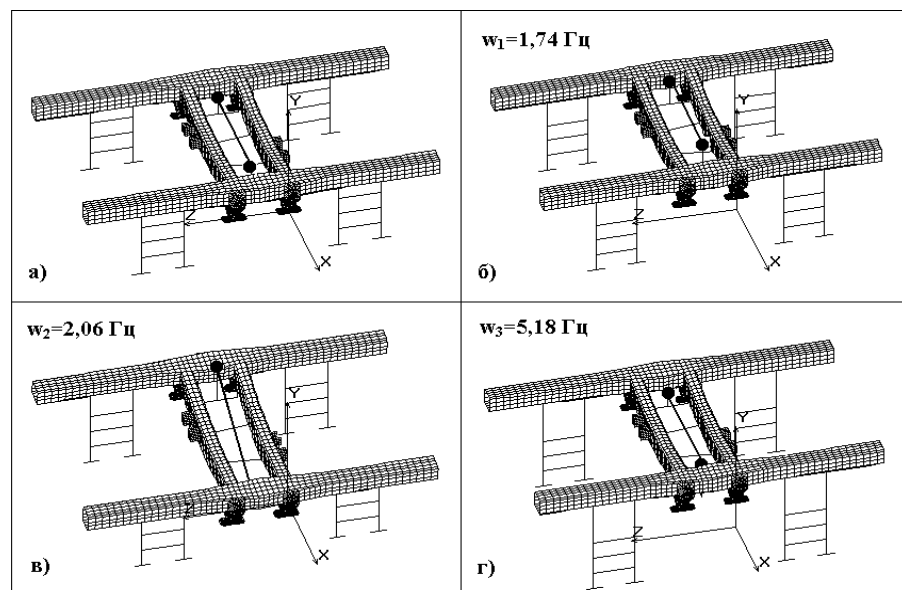
Рис. 2. Вертикальна схема закріплення вібратора:

Д1, Д2, Д3 – вібродатчики

Таблиця 1

Розрахункові та експериментальні значення власних частот рам візків

№ частоти	Значення частоти, Гц		Відмінність, %
	розрахунок	експеримент	
1	1,74	1,75	0,57
2	2,06	-	-
3	5,18	5	3,6
4	5,25	5	4,7
5	30,54	30	1,8
6	49,1	50	1,8
7	103,78	103	0,76
8	142,75	143	0,17

**Рис. 3. Форми власних коливань рами візка типу 81-717:**

а) рама в недеформованому стані; б, в, г) перші три форми власних коливань рами

4. Аналіз напружено-деформованого стану рам візків вагонів при динамічному навантаженні. Проведено експериментальні дослідження зовнішнього навантаження, викликаного нерівностями шляху, на окремих ділянках Харківського метрополітену. Результати експериментальних досліджень у

вигляді реалізацій віброприскорень буксового вузлу та спектральної щільності вертикальних прискорень на швидкості 60 км/г показані на 4 і 5 відповідно. Експериментальні дослідження зовнішнього навантаження показують, що для спектра сигналу характерні підйоми рівнів спектральної щільності на частотах, близьких до 30 Гц, що обумовлене коливаннями колісних пар та елементів шляху (рис. 5).

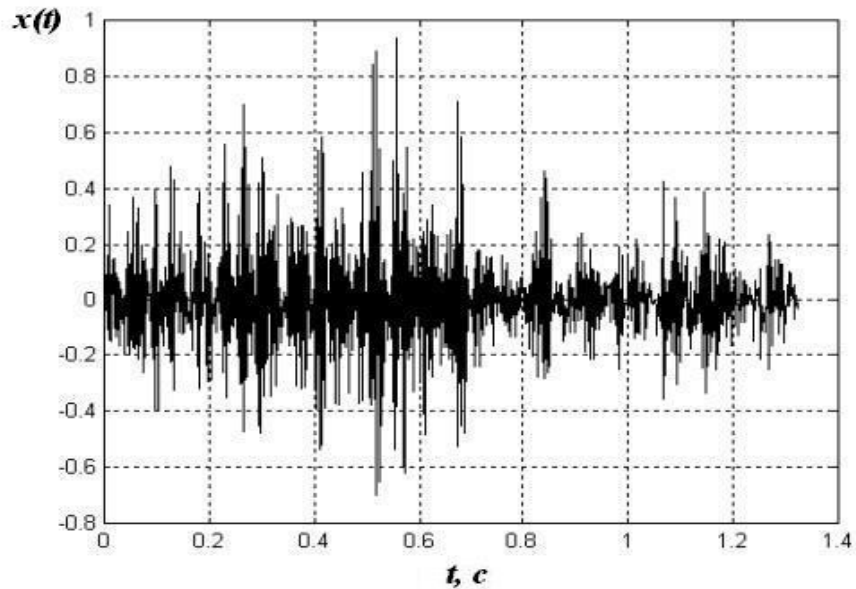


Рис. 4. Реалізація віброприскорення буксового вузла на швидкості 60 км/г

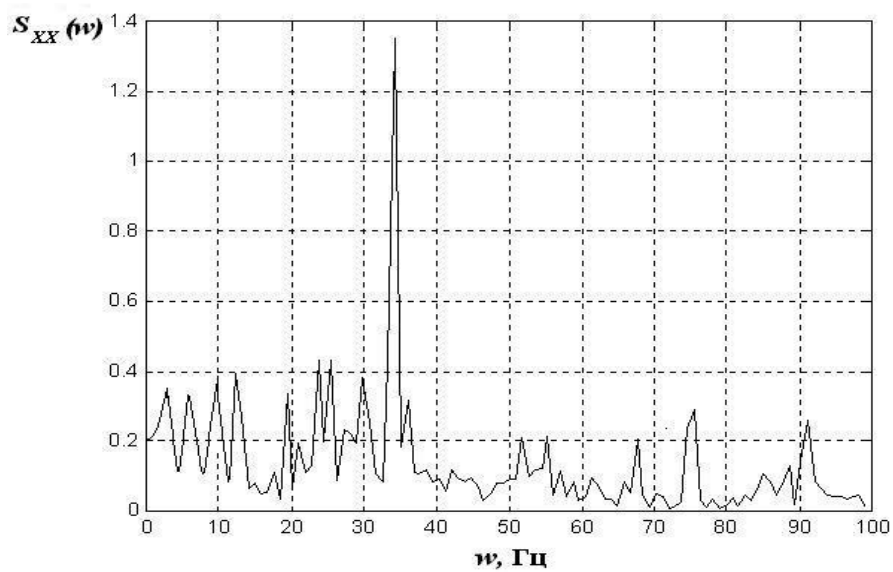


Рис. 5. Спектральна щільність вертикальних прискорень на швидкості 60 км/г

Для проведення розрахунків випадкових вимушених коливань рам візків використовуються моделі зовнішнього навантаження у вигляді кусково-сталіх функцій спектральної щільності на певних швидкісних діапазонах (табл. 2).

Таблиця 2

Спектральна щільність вертикальних прискорень

Швидкість, км/г	Інтенсивність, (м/с ²) ² /Гц		
	0-25 Гц	0-25 Гц	0-25 Гц
47	0,27	1,08	0,27
60	0,36	1,35	0,36
72	0,45	1,55	0,45

Вирішена задача випадкових вимушених коливань рам візків на основі МСЕ. Матричне рівняння руху має вигляд [1, 3]

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = -([M][A] + [M_1])\{\ddot{\eta}\} - ([C][A] + [C_1])\{\dot{\eta}\}, \quad (1)$$

де $[M]$, $[C]$, $[K]$ – глобальні матриці мас, демпфірування, жорсткості, $[A]$ – матриця псевдостатичних коефіцієнтів впливу, що визначається співвідношенням $[A] = -[K]^{-1}[K_1]$, $[M_1]$, $[C_1]$ і $[K_1]$ – підматриці, що дозволяють виразити зусилля, що діють на систему, через відомі прискорення, швидкості і переміщення кінематично порушуваних відміток конструкції, $\{q\}$ – вектор узагальнених вузлових переміщень СЕ моделі, $\{\dot{\eta}\}$, $\{\ddot{\eta}\}$ – вектори швидкостей і прискорень буксових вузлів рами візка, викликаних нерівностями шляху.

Вираз для спектральної щільності вузлових переміщень СЕ моделі рами візку вагона з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари рами візка має вигляд [1, 3]

$$S_{q_j}(\omega) = \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \phi_{jl} \phi_{jk} \left[\sum_{\lambda=1}^r \sum_{\mu=1}^r G_{\lambda l} G_{\mu k}^* H_l^*(i\omega) H_k(i\omega) S_{\eta}(\omega) \exp(-i\omega \tau_{\lambda\mu}) \right] \cdot (j = \overline{1, n}), \quad (2)$$

де $S_{ij}(\omega)$ – спектральна щільність віброприскорень буксових вузлів рами візку (табл. 2), $G_{\lambda l}$ – амплітуди узагальнених сил, ϕ_{jl} – елементи вектора власних форм, $H_l(i\omega)$ – амплітудно-частотна характеристика, r – число входів, $\tau_{\lambda\mu}$ – час запізнювання навантаження між λ -м та μ -м входами ($\tau_{\lambda\mu} = l_{\lambda\mu}/V$, де $l_{\lambda\mu}$ – відстань між входами, V – швидкість вагона).

Дисперсія вузлових переміщень СЕ моделі визначається співвідношенням

$$\sigma_{q_j}^2 = \int_0^{\infty} S_{q_j}(\omega) d\omega. \quad (3)$$

Для розрахунку випадкових вимушених коливань рам візків вагонів повідкового типу з урахуванням запізнювання зовнішнього навантаження використовувався програмний комплекс COSMOS/M. Результати чисельних досліджень випадкових вимушених коливань рам візків у вигляді графіків логарифмів спектральної щільності вертикальних переміщень для точки кріплення електродвигуна до кронштейна підвіски тягового електродвигуна (ТЕД) даються на рис. 6. Дослідження показують, що підйом рівнів спектральної щільності для кронштейну підвіски ТЕД спостерігається поблизу власних частот коливань: $p_1=1,23$ і $p_3=5,03$ Гц (рис. 6). На рисунку видно порізаність графіків та наявність нульових точок, що обумовлене різницею фаз при подачі навантаження на першу і другу колісні пари візка. Також одержано, що із збільшенням швидкості руху візка збільшуються значення спектральної щільності поблизу власних частот p_1 та p_3 , згладжується порізаність графіків та збільшується відстань між нульовими точками. Зона максимальних динамічних напружень в районі кронштейна буксових повідців показана на рис. 7.

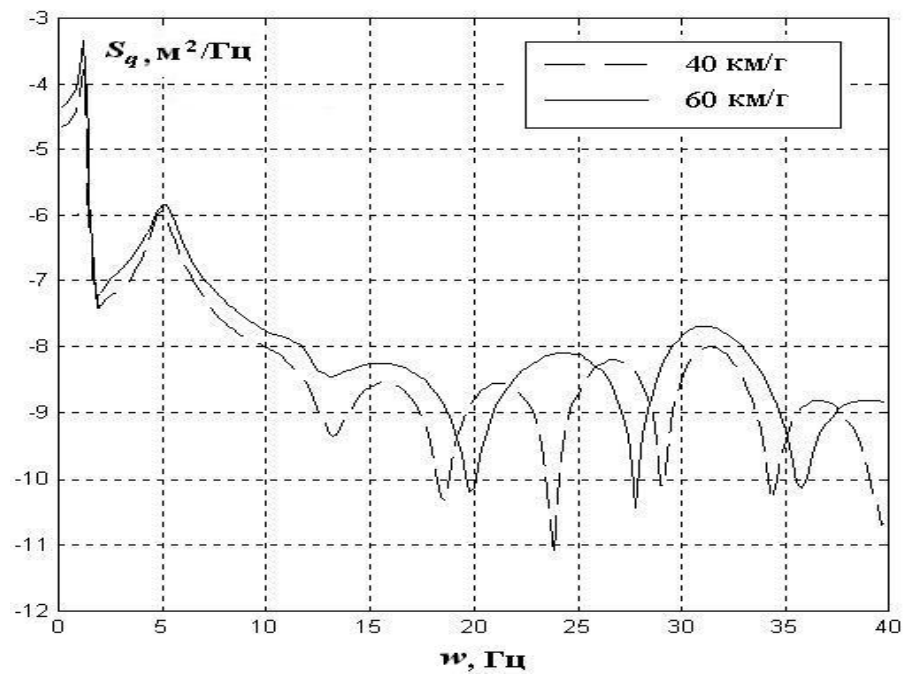


Рис. 6. Спектральна щільність вертикальних переміщень точки кріплення електродвигуна до кронштейна підвіски ТЕД при швидкостях 40, 60 км/г

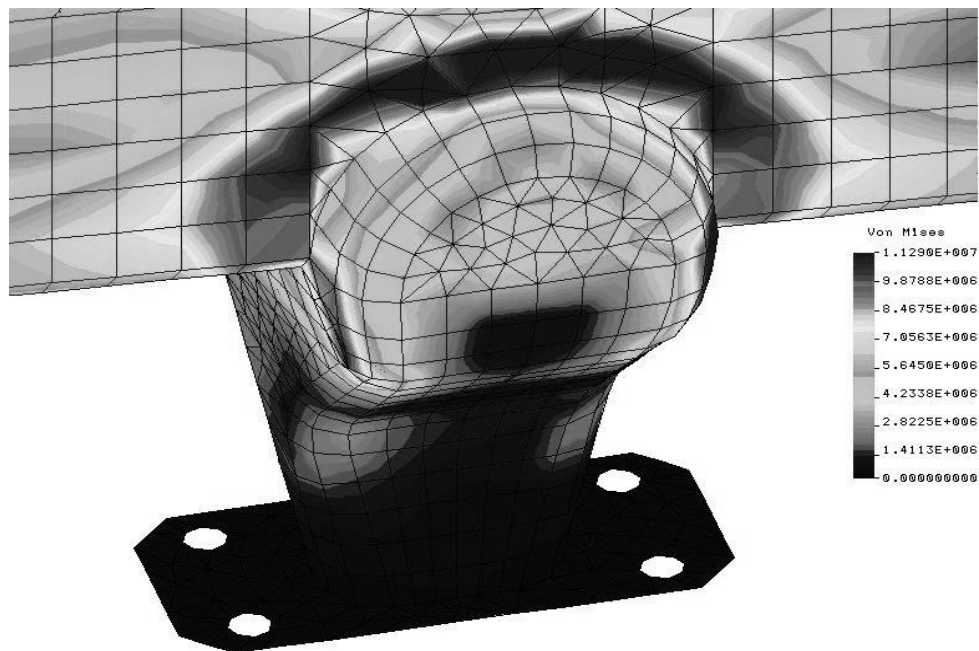


Рис. 7. Динамічні напруження в районі кронштейна буксових повідців

5. Прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів.

5.1. Вирішення прямої задачі надійності. Пряма задача надійності рам візків

полягає у визначенні ймовірнісних характеристик безвідмовності (щільностей імовірності пробігів до появи втомних тріщин) за відомими ймовірнісними характеристиками навантаження і опору втомі конструкції.

Для прогнозування характеристик надійності розглянемо вираз для пробігу візка вагону до появи втомної тріщини при детермінованому блоковому навантаженні і детермінованому значенні межі витривалості [1-3]

$$L = L_0 \left(\frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_a} \right)^m, \quad (4)$$

де $L_0 = \frac{N_0 V_c}{3600 f_e}$ (N_0, m – параметри кривої втоми, V_c – середня швидкість,

яка дорівнює 50 км/г, f_e – ефективна частота), σ_{-1D} – межа витривалості конструкції з урахуванням асиметрії циклу за способом Серенсена-Кіносашвілі,

$\sigma_a = \sqrt[m]{\sum_i \frac{P_i V_c}{V_i} \sigma_{ai}^m}$ (σ_a – приведена амплітуда напружень, σ_{ai} – амплітуда напру-

жень при i -му режимі навантаження ($\sigma_{ai} \leq \sigma_{-1D}$), P_i – імовірність появи швидкості руху V_i в експлуатації).

Співвідношення (4) з урахуванням безрозмірних змінних $s = L/L_0$ і $r = \sigma_{-1D}/\sigma_a$ можна подати у вигляді

$$s = r^m, \quad (r \leq 1). \quad (5)$$

Щільність імовірності безрозмірних пробігів s на основі використання функціонального перетворення випадкових величин (5) запишемо так:

$$f(s) = \frac{1}{m} f(r = s^{1/m}) s^{\frac{1-m}{m}}. \quad (6)$$

Для вирішення задачі застосовувався метод умовних щільностей імовірності [8]. При визначенні щільності ймовірності $f(\sigma_a)$ використовувався метод статистичного моделювання амплітуд напружень σ_{ai} [3, 8 - 10]. Проведені чисельні дослідження показали, що умовна щільність імовірності приведених амплітуд напружень $f(\sigma_a/\sigma_{-1D})$ для фіксованого σ_{-1D} підкоряється нормаль-

ному закону. Тому вираз для безумовної щільності ймовірності змінної r має вигляд

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a} \int_a^b \exp\left[-\frac{((\sigma_{-1D}/r) - m)^2}{2\sigma^2}\right] \frac{\sigma_{-1D}}{r^2} f(\sigma_{-1D}) d\sigma_{-1D}, \quad (7)$$

де $f(\sigma_{-1D})$ – щільність імовірності межі витривалості, a, b – межі інтегрування, що визначаються таким чином

$$\begin{cases} a = \sigma_{-1H}, & b = \sigma_{aB} \cdot r & \text{при } r_{\min} \leq r \leq r'; \\ a = \sigma_{aH}, & b = r \cdot \sigma_{-1B} & \text{при } r' \leq r \leq 1, \end{cases} \quad (8)$$

де $\sigma_{-1H}, \sigma_{aH}, \sigma_{-1B}, \sigma_{aB}$ – мінімальні та максимальні значення межі витривалості і приведеної амплітуди напружень, $r_{\min} = \sigma_{-1H} / \sigma_{aB}$, $r' = \sigma_{-1B} / \sigma_{aB}$.

Для межі витривалості використовувалася суперпозиція двох нормальних законів з такими параметрами: математичні сподівання $m_{\sigma-1D} = 18$ МПа, 30 МПа, СКВ $\sigma_{\sigma-1D} = 2,28$ МПа. Розрахункова та експериментальна щільності ймовірності $f(s)$ для рам візків типу ЄЖ-3 зображені на рис. 8. Результати показують, що розрахункова щільність імовірності $f(s)$ добре узгоджується з експериментальною щільністю ймовірності.

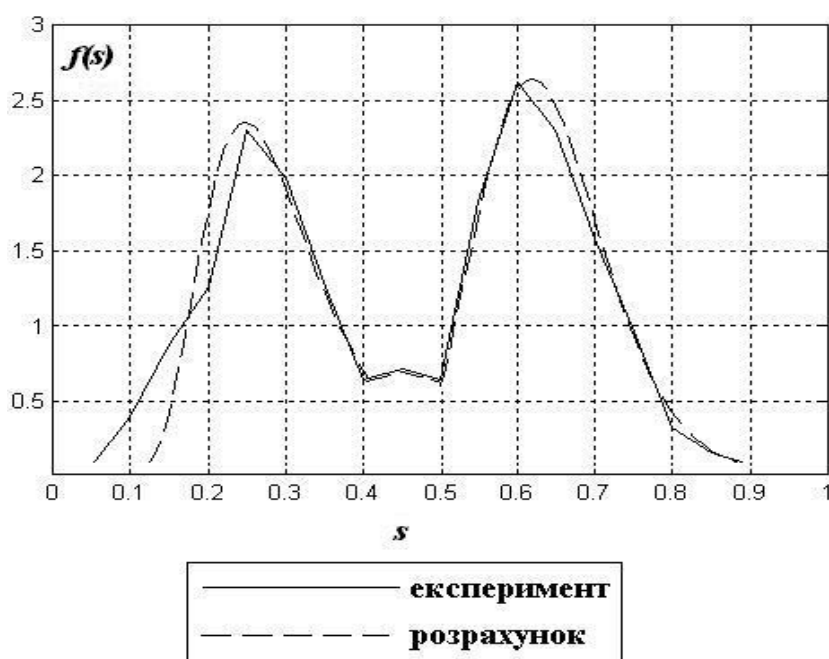


Рис. 8. Щільність імовірності $f(s)$

5.2 Вирішення оберненої задачі надійності. Обернена задача надійності рам візків полягає у визначенні ймовірнісних характеристик навантаження за відомими ймовірнісними характеристиками безвідмовності і опору втомі конструкції.

Щільність імовірності змінної r згідно з формулами функціонального перетворення випадкових величин (5) має вигляд

$$f(r) = f(s = r^m) m r^{m-1} = \frac{m \cdot r^{m-1}}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(r^m - m_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad r \leq 1. \quad (9)$$

Тоді безумовна щільність імовірності приведених амплітуд напружень набуде вигляду

$$f(\sigma_a) = \frac{m}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \int_c^d \exp\left[-\frac{((\sigma_{-1D}/\sigma_a)^m - m_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \left(\frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_a}\right)^{m-1} \cdot \frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_a^2} f(\sigma_{-1D}) d\sigma_{-1D}, \quad (10)$$

де c, d – межі інтегрування, що визначаються таким чином

$$\begin{cases} c = \sigma_{-1H}, & d = \sigma_a & \text{при } \sigma_a \leq \sigma_{-1B}; \\ c = \sigma_{-1H}, & d = \sigma_{-1B} & \text{при } \sigma_a > \sigma_{-1B}. \end{cases} \quad (11)$$

Результати розрахунку щільності ймовірності приведених амплітуд напружень і її апроксимація у вигляді нормального закону зображені на рис. 9.

Для прогнозування безвідмовності рам візків типу 81-717 за даними про відмови прототипу – ЄЖ-3 використовується підхід, наведений в пункті 1. Обмежені статистичні дані про відмови рам візків типу 81-717 свідчать, що гарантована оцінка для пробігу до появи перших втомних тріщин візків типу 81-717, одержана з умов експлуатації вагонів метрополітену м. Харкова, складає $L = 1,9$ млн. км ($s = 0,4$) і є нижньою межею щільності ймовірності пробігів. Тому приймається, що щільність імовірності пробігів $f(s)$ цих візків буде унімодальною (рис. 10). Вирішення прямої задачі надійності рам візків типу 81-717 проводилося згідно з розробленими методами. Для межі витривалості використовувалися такі параметри нормального закону: математичне споді-

вання $m_{\sigma-1D} = 30$ МПа, СКВ $\sigma_{\sigma-1D} = 2,28$ МПа. Результати розрахунків щільності ймовірності $f(s)$ показані на рис. 11.

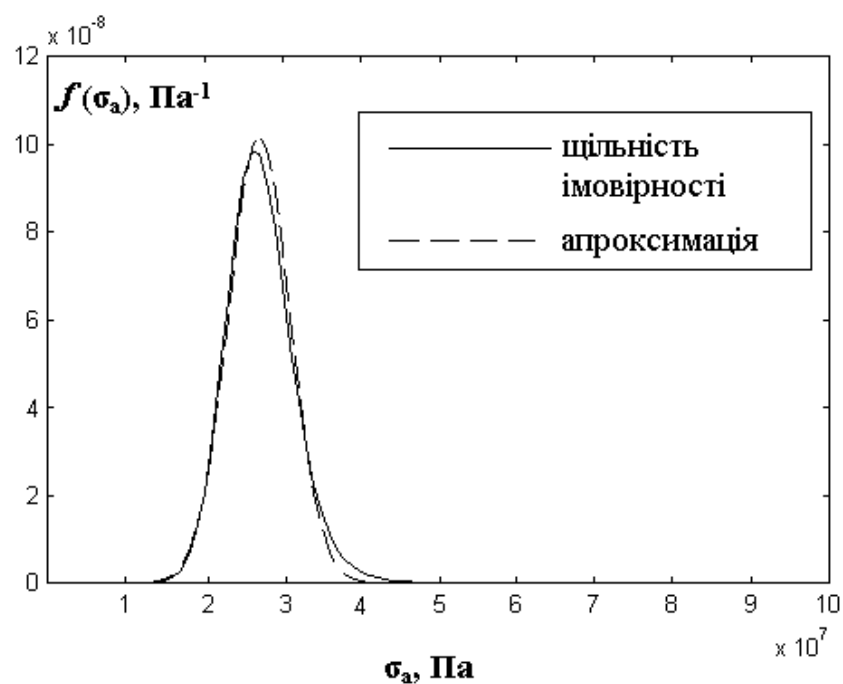


Рис. 9. Щільність імовірності приведених амплітуд напружень та її апроксимація

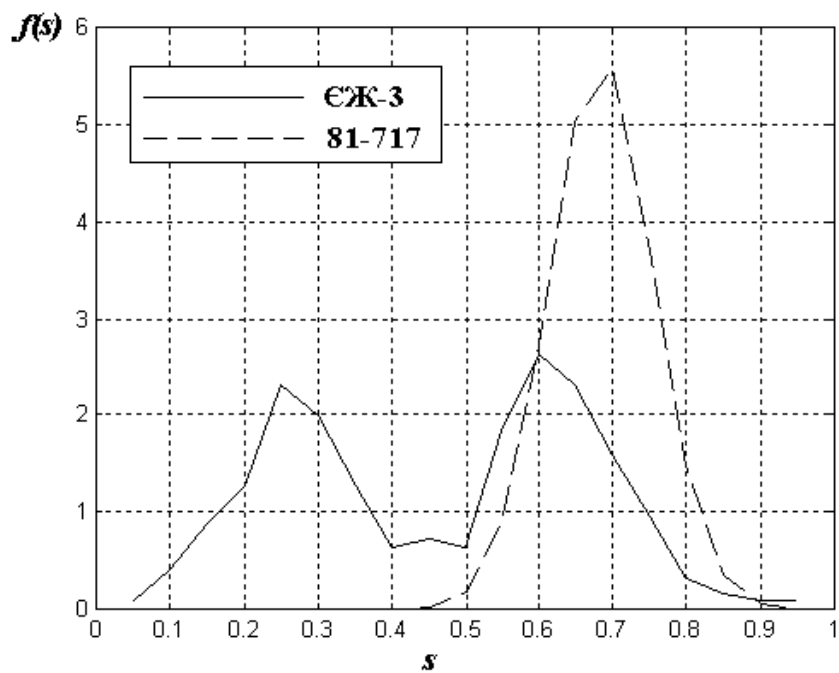


Рис. 10. Щільності ймовірності $f(s)$ для рам візків серій ЄЖ-3 і 81-717

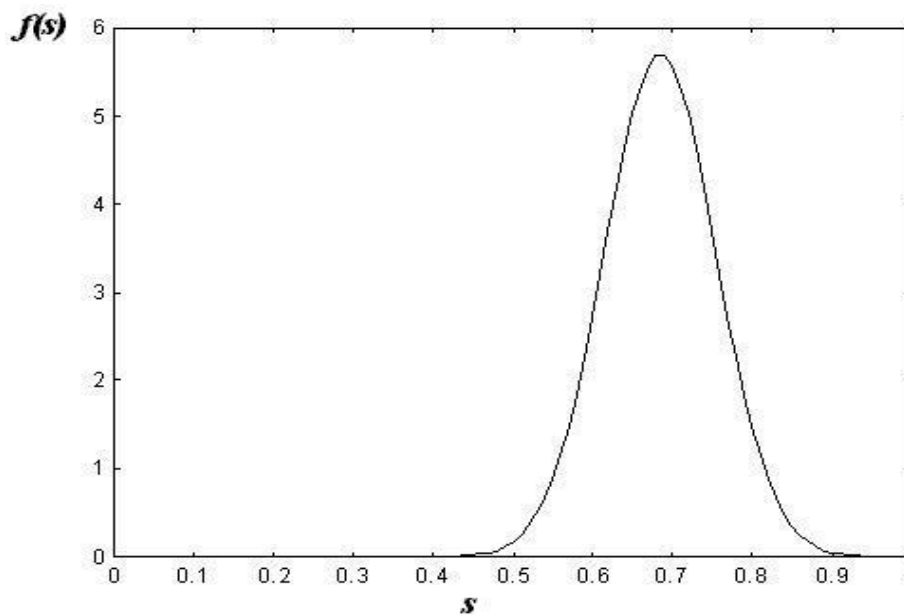


Рис. 11. Розрахункова щільність імовірності $f(s)$ для рам візків серії 81-717

Висновки

1. Побудовано просторові скінченно-елементні моделі рам візків вагонів електропоїздів, які враховують конструктивні, технічні, експлуатаційні особливості єдиної динамічної системи «візок-шлях».

2. Розроблено методи вирішення задач випадкових вимушених коливань рам візків вагонів при квазістаціонарному випадковому навантаженні, викликаному нерівностями шляху, з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового навантаження на колісні пари рам візків.

3. Розроблено методи прогнозування безвідмовності рам візків вагонів за даними про відмови прототипу.

Література

1. Бирюков И.В. Механическая часть тягового подвижного состава: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Бирюков И.В., Савоськин А.Н., Бурчак Г.П. и др. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
2. Савоськин А.Н. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / Савоськин А.Н., Бурчак Г.П., Матвеевичев А.П. и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

3. *Белоцерковский А.Б.* Прогнозирование надежности рам тележек вагонов электропоездов / Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А. // Вісн. Нац. Техн. Ун-та “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – №47. – С. 61-70.
4. *Егоренков А.В.* Обоснование технических решений по повышению усталостной долговечности рам шпинтонного типа тележек вагонов метро: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 2002. – 21 с.
5. *Добровольская Э.М.* Вагоны метрополитена типа Е. Устройство и обслуживание. – М: Транспорт, 1989. – 302 с.
6. *Раков В.А.* Локомотивы отечественных железных дорог (1956-1975 гг.). – М.: Транспорт, 1999. – 443 с.
7. *Жовдак В.А.* Прогнозирование остаточного ресурса элементов конструкций вагонов метрополитена / Жовдак В.А., Смирнов М.М., Ломакин А.Н. и др. // Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций. – Киев, 2000.– 1. – С. 883-888.
8. *Болотин В.В.* Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
9. *Жовдак В.А, Мищенко И.В.* Прогнозирование надежности элементов конструкций с учетом технологических и эксплуатационных факторов / Жовдак В.А, Мищенко И.В. – Харьков: Харьк. Гос. Политехн. Ун-т, 1999. – 120 с.
10. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1974. – 552 с.

Поступила в редакцию

18.05.06